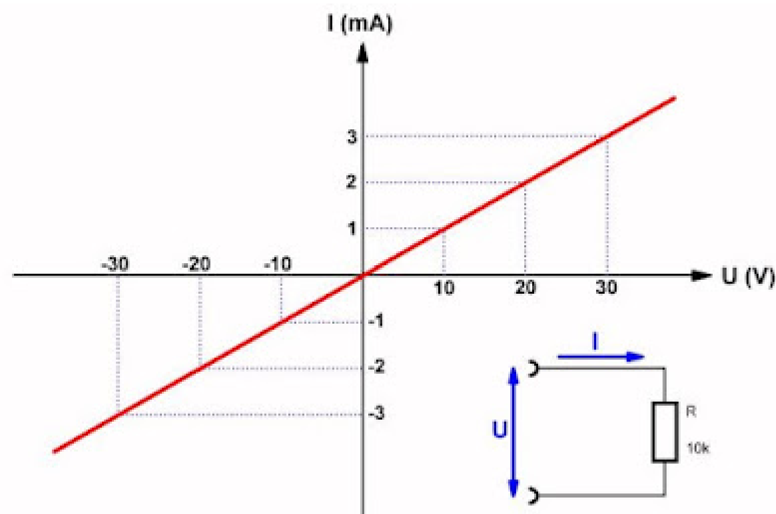
Niet lineaire weerstanden

Bij niet lineaire weerstanden bestaat er geen lineair verband tussen de spanning over en de stroom door het onderdeel. In de schakelpraktijk kunt u VDR's, NTC's, PTC's, LDR's en MDR's tegenkomen als typische vertegenwoordigers van dit soort onderdelen.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 16-12-2017

Inleiding

Lineaire weerstanden
Gewone vaste weerstanden, zoals de bekende kool- of metaalfilmweerstanden, zijn lineaire elementen. Dat betekent dat er een lineair verband bestaat tussen de spanning die u over de weerstand zet en de stroom die door de weerstand loopt. Dit lineaire verband is uitgezet in de grafiek van onderstaande figuur. De kromme die de relatie tussen spanning en stroom geeft is een rechte lijn. Als de spanning over de weerstand verdubbelt van 10 V naar 20 V, dan zal de stroom ook verdubbelen. Het verband tussen stroom en spanning wordt immers gegeven door de wet van Ohm:
$U = I \cdot R$



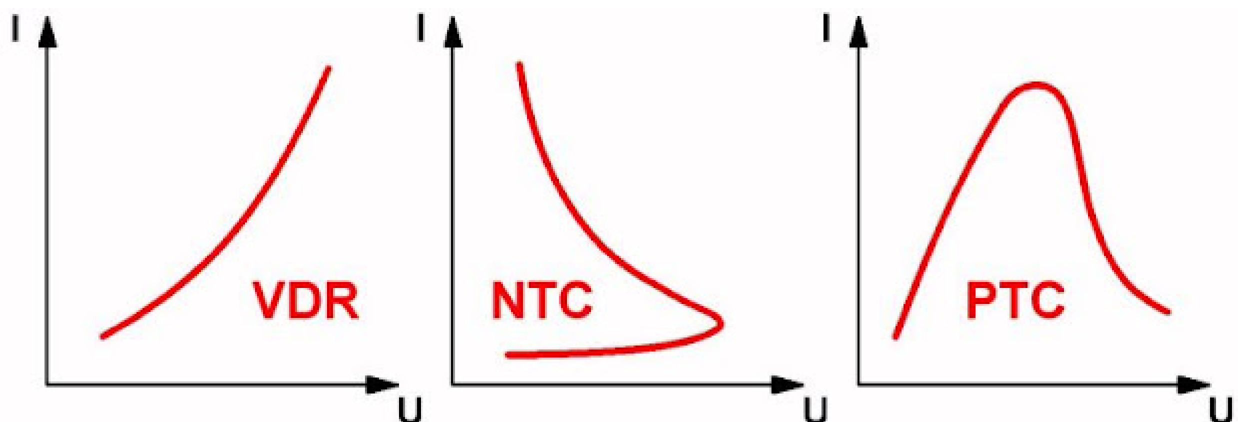
Het lineaire verband tussen stroom en spanning bij een gewone weerstand. (© 2017 Jos Verstraten)

Niet lineaire weerstanden
Er is een aantal soorten weerstanden ontwikkeld, waarbij het verband tussen stroom en spanning niet lineair is. Deze niet-lineariteit wordt veroorzaakt door het feit dat de weerstand geen constante waarde heeft, maar afhankelijk is van bepaalde externe factoren. De drie voornaamste soorten zijn:

- **VDR**
  Voltage **D**ependant **R**esistor, waarbij de weerstand kleiner wordt naarmate de spanning over het onderdeel stijgt. Het gevolg is dat de stroom meer dan lineair toeneemt met stijgende spanning over het onderdeel.

- **NTC**
  Weerstand met **N**egatieve **T**emperatuurs**C**oëfficiënt, waarbij de weerstand daalt als de temperatuur van het onderdeel stijgt. Omdat de temperatuur van een weerstand uiteraard ook afhankelijk is van het gedissipeerde vermogen, dus van de stroom en de spanning, is het rechtstreekse gevolg dat het verband tussen I en U niet lineair is.
- **PTC**
  Weerstand met **P**ositieve **T**emperatuurs**C**oëfficiënt, waarbij de weerstand stijgt als het onderdeel warmer wordt. Om dezelfde reden als bij de NTC veroorzaakt dit verschijnsel een niet lineair verband tussen spanning en stroom.

De niet lineaire karakteristieken
De typische niet lineaire karakteristieken van deze drie onderdelen zijn samengevat in onderstaande figuur. De vreemdsoortige karakteristieken van NTC en PTC zijn een gevolg van een aantal niet-lineariteiten die zich opstapelen. Omdat stroom en spanning zich niet lineair verhouden, bestaat er ook geen lineair verband tussen deze grootheden en het in de weerstand gedissipeerd vermogen. Bovendien is het verband tussen gedissipeerd vermogen en temperatuur van het onderdeel ook niet lineair. De cirkel wordt gesloten doordat het verband tussen temperatuur en weerstand ook niet lineair is.



De niet lineaire karakteristieken van een VDR, een NTC en een PTC. (© 2017 Jos Verstraten)

De LDR en de MDR
Naast de drie genoemde niet lineaire weerstanden bestaan er nog twee andere soorten, die u ook bij de niet lineaire weerstanden kunt onderbrengen. In feite is dit niet terecht want als de weerstand van deze onderdelen constant wordt gehouden, dan gedragen zij zich als een normale weerstand, dus met een lineair verband tussen spanning en stroom. Maar omdat in alle naslagwerken en encyclopedieën deze weerstanden als niet lineaire weerstanden worden beschouwd, worden zij toch in dit hoofdstuk besproken:

- **LDR**
  Light **D**ependant **R**esistor, heeft een weerstand die daalt als het onderdeel belicht wordt.
- **MDR**
  Magnetic **D**ependant **R**esistor, heeft een weerstand die afhankelijk is van de magnetische flux die op het onderdeel invalt.

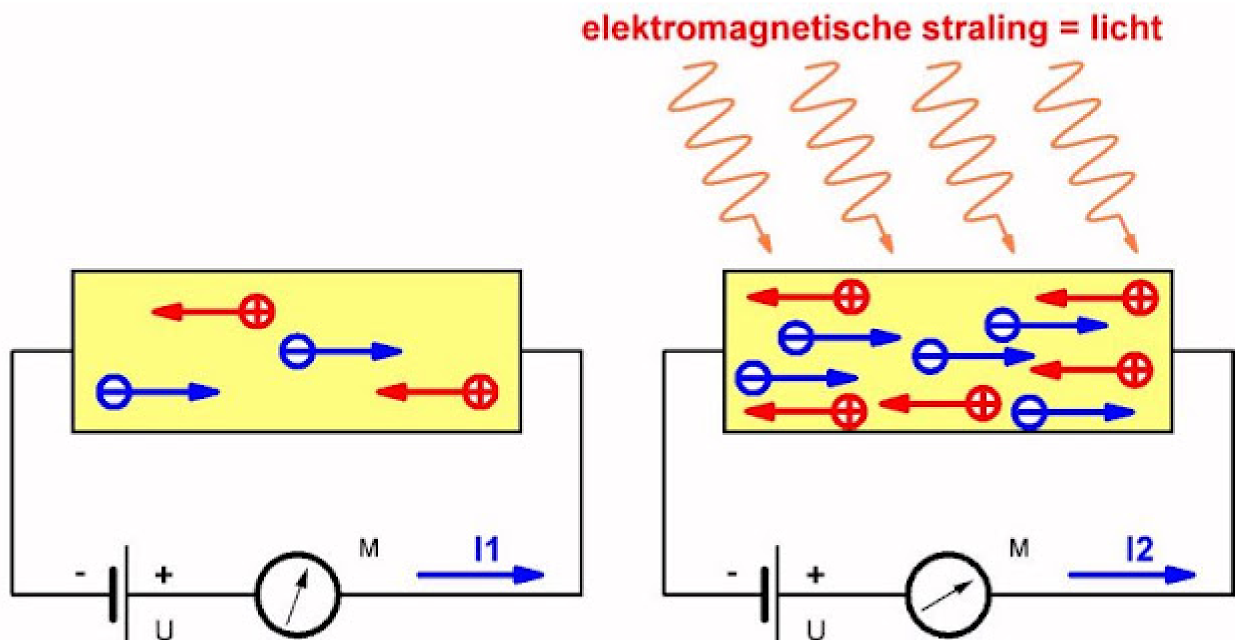
LDR-weerstanden

Wat zijn het?
LDR's zijn weerstanden waarvan de waarde daalt naarmate er meer licht op de weerstand valt. Met LDR's kunt u op een heel eenvoudige manier lichtsluizen of schemerschakelaars ontwerpen.

Fabricage
Lichtgevoelige weerstanden kunnen uit diverse materialen worden gemaakt. In de meeste gevallen wordt gebruik gemaakt van gesinterd cadmium-selenide of cadmiun-sulfide, waarbij de voorkeur wordt gegeven aan laatstgenoemde verbinding omdat deze zijn maximale gevoeligheid heeft voor de golflengte waarbij ook het menselijke oog zijn maximale gevoeligheid heeft. Daarnaast worden echter ook bepaalde halfgeleiders gebruikt, zoals germanium, silicium, gallium-arsenide en indium-antimoon.

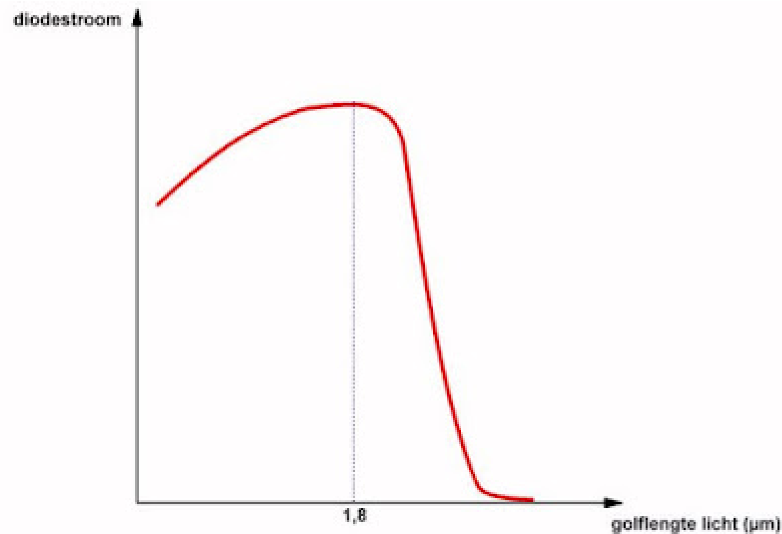
De lichtgevoeligheid
De lichtgevoeligheid kan worden verklaard doordat er in de genoemde materialen vrij veel beweeglijke ladingsdragers, gaten en elektronen, aanwezig zijn. De beweeglijkheid kan stijgen als de ladingsdragers energie absorberen van elektromagnetische straling die op het materiaal invalt. Voor het genereren van een 'koppel', een gat/elektron-combinatie, moet er echter wel een minimale energie noodzakelijk zijn. Deze minimale energie hangt af van het materiaal. De energie die elektromagnetische straling kan afstaan is onder meer afhankelijk van de golflengte. Deze energie wordt uitgedrukt in elektronvolt, eV. Vandaar dat LDR's niet voor alle soorten licht even gevoelig zijn.

Fysische werking
In onderstaande figuur is getekend wat er in een LDR gebeurt als het onderdeel op een spanningsbron U wordt aangesloten. Als de LDR niet belicht wordt (links), dan zal er toch een zeer kleine stroom door de keten vloeien. De weerstand van de onbelichte LDR is dus zeer hoog. Deze stroom is het gevolg van spontane verplaatsing van ladingsdragers, onder meer als gevolg van thermische agitatie in het materiaal.
Als u de LDR belicht (rechts) neemt het aantal vrije ladingsdragers in het materiaal sterk toe. De gaten migreren naar de negatieve pool van de spanningsbron om een elektron op te nemen. De elektronen gaan naar de positieve pool van de spanningsbron om zich te koppelen aan een positief ion. Als gevolg van deze activiteit gaat er een grotere stroom door de keten vloeien, het beste bewijs dat de weerstand van de LDR kleiner is geworden.



De werking van een LDR fysisch verklaard. (© 2017 Jos Verstraten)

Spectrale gevoeligheid van LDR's
Zoals reeds geschreven hangt de gevoeligheid van LDR's onder meer af van het materiaal waaruit het onderdeel is opgebouwd en van de golflengte van het licht. In onderstaande figuur is de gevoeligheidskromme getekend van een germanium-LDR. Het maximum ligt bij lichtstraling met een golflengte van 1,8 μm.



Spectrale gevoeligheid van germanium LDR's. (© 2017 Jos Verstraten)

Uit onderstaand overzicht kan de maximale spectrale gevoeligheid en de minimale energie afgeleid worden voor verschillende basismaterialen.

Germanium

- Minimale energie: 0,7 eV
- Maximale spectrale gevoeligheid: 1,8 µm

Silicium

- Minimale energie: 1,1 eV
- Maximale spectrale gevoeligheid: 1,0 µm

InSb

- Minimale energie: 0,23 eV
- Maximale spectrale gevoeligheid: 6,0 µm

GaAs

- Minimale energie: 1,35 eV
- Maximale spectrale gevoeligheid: 0,85 µm

CdS

- Minimale energie: 1,20 eV
- Maximale spectrale gevoeligheid: 0,55 µm

Weerstand in functie van verlichtingssterkte

De weerstand van een LDR wordt gegeven door de uitdrukking:

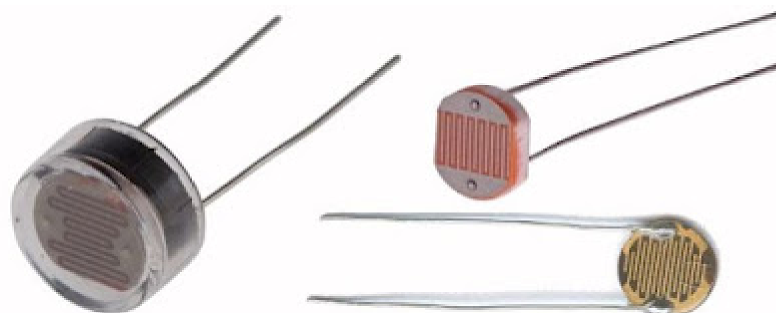
$R = A \bullet E^{-\alpha}$

waarin:

- R de weerstand is in ohm.
- E de verlichtingssterkte is in lux.
- A en α constanten zijn van het materiaal.

LDR's in de dagelijkse lab-praktijk

Bij het ontwerpen van schakelingen zult u waarschijnlijk alleen maar met LDR's uit cadmium-sulfide (CdS) te maken krijgen. In onderstaande figuur zijn drie uitvoeringen van deze onderdelen gegeven.



Praktische uitvoeringen van cadmium-sulfide LDR's. (© diverse internet-bronnen)

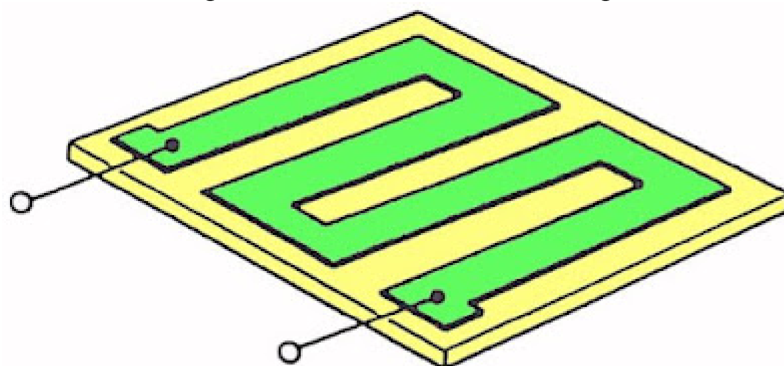
Specificaties van cadmium-sulfide LDR's
Een kort overzicht van de gemiddelde specificaties van deze onderdelen:
- Donkerweerstand: ongeveer 100 MΩ
- Weerstand bij 1000 lux: 300 Ω à 75 Ω
- Hersteltijd: 200 kΩ/s
- Maximale spanning: 150 V
- Parasitaire capaciteit: 6 pF

MDR-weerstanden

Wat zijn het?
MDR's zijn weerstanden waarvan de waarde afhankelijk is van het magnetisch veld dat door de weerstand gaat. Hoe groter het magnetisch veld, hoe hoger de weerstand wordt. MDR's kunt u bijvoorbeeld gebruiken bij het ontwerpen van toerentellers, waarbij een permanent magneetje op een draaiende as voor de weerstandsvariatie zorgt.

Principe
De werking van deze onderdelen berust op het Gauss-effect. Als u een stroomvoerende geleider loodrecht in een magnetisch veld brengt, dan zal dit veld proberen de ladingsdragers te laten afwijken van hun baan door de geleider. Daardoor ontstaat een verschuiving van het stroompad door de geleider, waardoor de geleidende doorsnede kleiner wordt en de weerstand toeneemt. Natuurlijk zal dit fysische effect niet bij alle materialen even sterk optreden. Zuivere metalen hebben er niet erg veel last van. Men is er echter in geslaagd verbindingen te ontwikkelen die maximaal door het Gauss-effect getroffen worden. Een heel bruikbare grondstof is InSb/NiSb, indium-antimonide/nikkel-antimonide, een halfgeleidend materiaal.

De technologie van MDR's
De meeste fabrikanten maken bij de productie van hun MDR's gebruik van het genoemde materiaal dat onder de vorm van een meander op een ceramisch substraat wordt aangebracht. Deze basisvorm is getekend in onderstaande figuur.

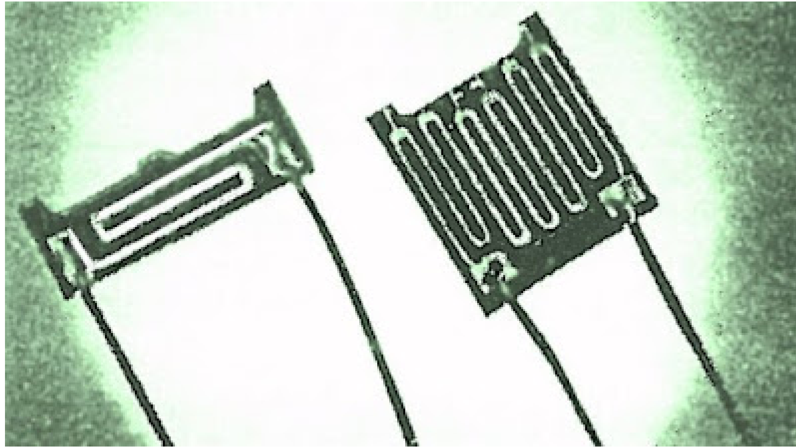


De constructie van MDR's van Siemens. (© Siemens)

Linearisering van de werking
Sommige fabrikanten brengen array's op de markt waarin vier identieke MDR's op één substraat zijn opgenomen en geschakeld als brug van Wheatstone. Hierdoor wordt niet alleen een grotere gevoeligheid bereikt, maar wordt het totaal ook minder gevoelig voor invloeden van de omgevingstemperatuur en verloopt de karakteristiek meer lineair.

MDR's in de dagelijkse lab-praktijk
In de praktijk zult u het meest te maken krijgen met de MDR's van Siemens. In onderstaande figuur zijn twee praktische uitvoeringen getekend. Deze componenten zijn slechts enige millimeter groot en dus ideaal voor inbouw in allerlei toepassingen. De linker MDR heeft als

typenummer FP17-D500E en heeft een basisweerstand van 500 Ω. De maximale weerstandsvariatie bedraagt een factor 15, de maximaal toelaatbare spanning over het onderdeel is 100 V.



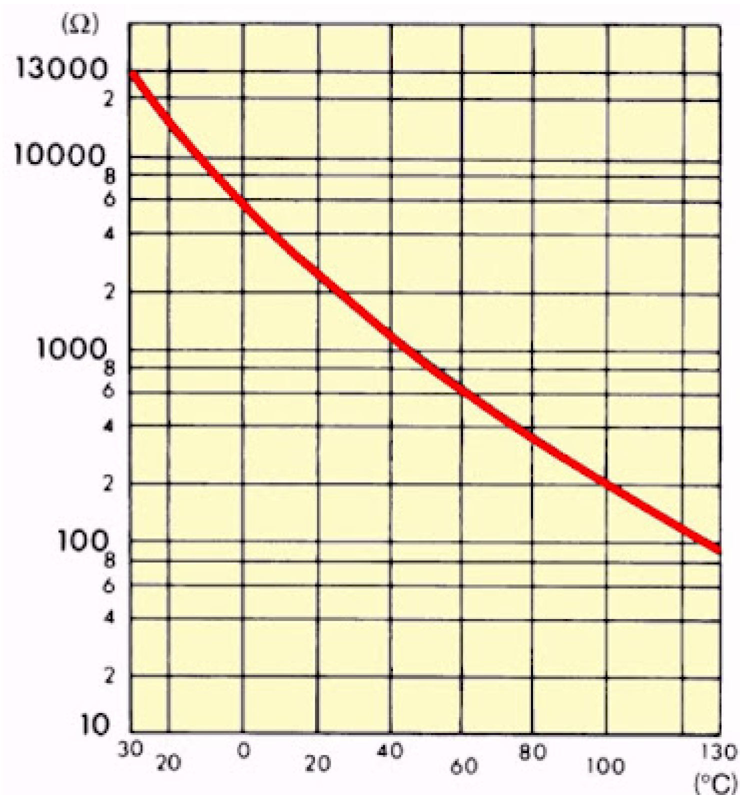
Twee MDR's die u in schakelingen kunt aantreffen. (© Siemens)

NTC-weerstanden

Wat zijn het?
NTC's zijn weerstanden waarvan de waarde daalt als de temperatuur van de weerstand stijgt. Met NTC's kunt u bijvoorbeeld schakelingen ontwerpen die de voeding van een eindversterker uitschakelen als de temperatuur van een koelplaat te hoog wordt. Ook bij het ontwerpen van niet al te nauwkeurige thermostaten komen NTC's goed van pas.

Fabricage
Als grondstof voor de fabricage van NTC-weerstanden wordt gebruik gemaakt van oxyden uit de ijzergroep, met name ijzer, chroom, kobalt, mangaan en nikkel. Hoewel deze stoffen op zich een onbruikbaar hoge soortelijke weerstand hebben wordt door menging met goede geleiders als lithium en titanium een bruikbare grondstof verkregen. Aan de poedervormige oxyden worden bindmiddelen toegevoegd, het mengsel wordt door middel van ceramische technieken omgezet in schijfjes of staafjes. De elektrische aansluitingen worden verkregen door opdampen van metalen vlakken.

Weerstandsverloop van NTC's
NTC's, die soms ook thermistoren worden genoemd, hebben een grote negatieve temperatuurscoëfficiënt. De weerstandswaarde daalt flink als het onderdeel verhit wordt. Uit de grafiek in onderstaande figuur, die het verband geeft tussen temperatuur en weerstandsverloop, blijkt bovendien dat het verband niet lineair is. Let op de logaritmische weerstand-as!



Weerstandsverloop van een typische NTC in functie van de temperatuur.
(© 2017 Jos Verstraten)

En nu wiskundig!

De relatie tussen weerstand en temperatuur verloopt exponentieel volgens de formule:

$R_t = R_n \cdot e^{B(1/T - 1/T_n)}$

waarin:

- R_t de weerstand van de NTC is bij de temperatuur t.
- R_n de weerstand van de NTC is bij 25 °C.
- B een constante is die wordt bepaald door de afmetingen van de NTC.
- T de omgevingstemperatuur is, uitgedrukt in graden Kelvin.
- e gelijk is aan 2,718.

Lineariseren van de karakteristiek

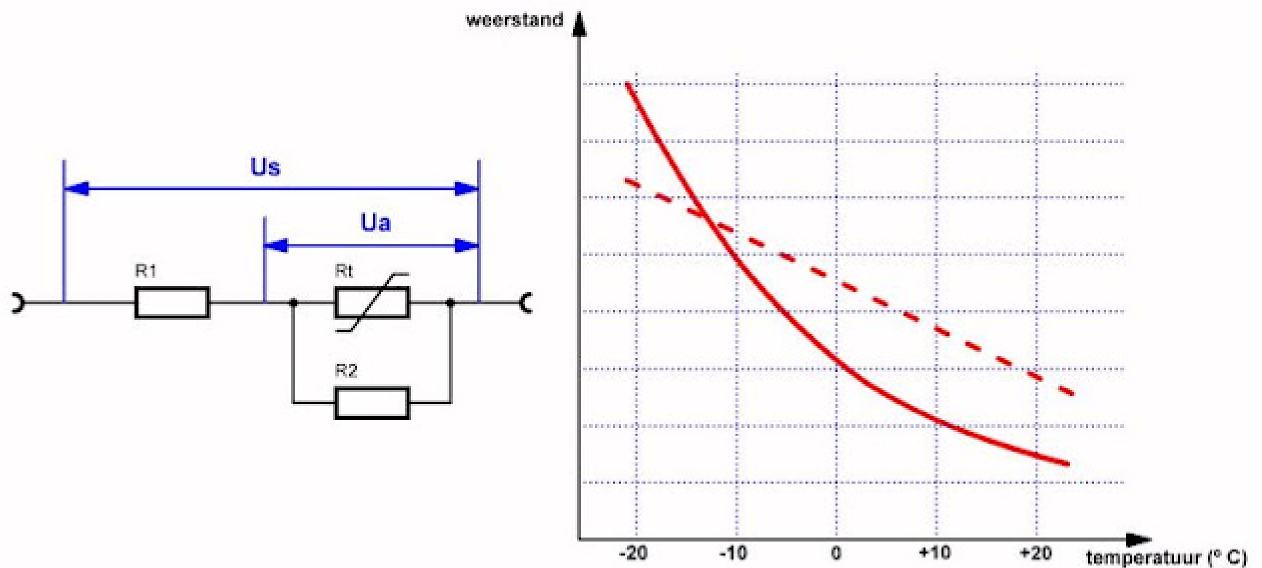
NTC's worden in de praktijk vaak gebruikt voor het meten van temperaturen. Als de uitlezing digitaal gebeurt moet er echter een lineair verband bestaan tussen de temperatuur en de weerstandsvariatie. Vandaar dat het noodzakelijk is de NTC te lineariseren. Gezegd moet worden dat dit niet over het volledige bruikbare temperatuurbereik kan. Een gebied van 50 tot 100 graden is het maximum, afhankelijk van de lineariteitsgrenzen die u stelt. In de praktijk zult u steeds een klein gebied moeten kiezen en het verband tussen weerstand en temperatuur rond dit gebied lineariseren. In onderstaande figuur is de standaard manier gegeven. De NTC wordt opgenomen in een serie/parallel-schakeling Ri/R_t/R2. De verhouding tussen de spanning U_s over de totale kring en de spanning U_a over de NTC wordt gegeven door de formule:

$U_a = U_s / [R1 (1 / R_t + 1 / R2) + 1]$

Hierin is:

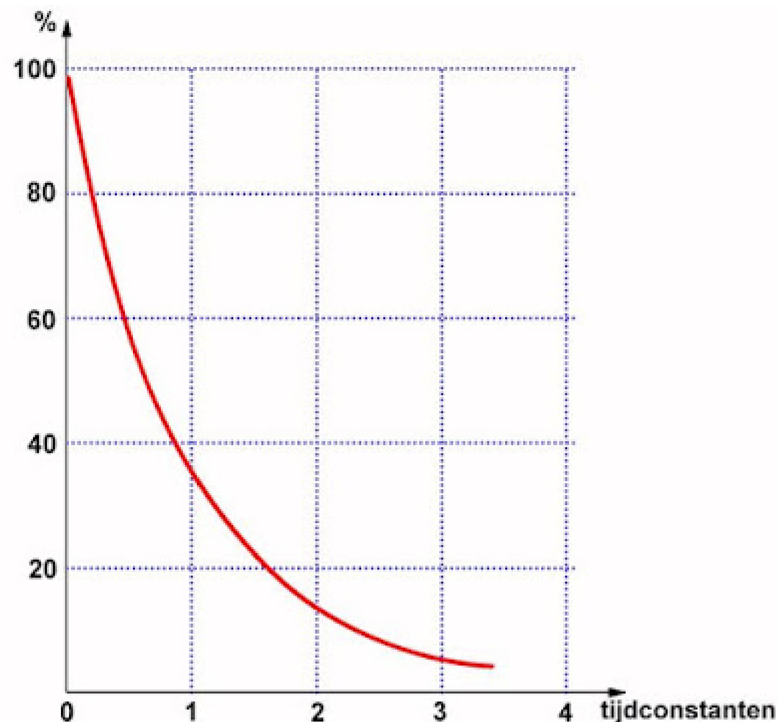
- R_t de weerstand van de NTC in het midden van het te lineariseren bereik.
- R1 de serieweerstand waarvan de waarde gelijk is aan R_t.
- R2 de parallelweerstand, waarvan de waarde gelijk is aan 10 • R_t.

In de rechter grafiek is het effect van zo'n linearisering getekend. De volle grafiek geeft het normale weerstandsverloop van een NTC, de gestippelde grafiek hetzelfde verloop na linearisering.



Lineariseringsschakeling voor een NTC. (© 2017 Jos Verstraten)

De thermische tijdconstante
Bij een plotselinge variatie van de buitentemperatuur duurt het een bepaalde tijd alvorens de NTC zich op de nieuwe omstandigheid gestabiliseerd heeft. Om dit verschijnsel te definiëren heeft men het begrip '*thermische tijdconstante'* ingevoerd. Deze grootheid geeft de tijdsduur aan waarin het temperatuurverschil tussen omgeving en NTC nog 38 % bedraagt. In onderstaande figuur is het verband gegeven tussen de procentuele benadering van de NTC-temperatuur ten opzichte van de omgevingstemperatuur en het aantal thermische tijdconstanten dat dit proces in beslag neemt.



Het begrip thermische tijdconstante grafisch toegelicht. (© 2017 Jos Verstraten)

NTC's in de dagelijkse lab-praktijk
NTC-weerstanden worden in schijfvorm aangeboden. In onderstaande figuur zijn dergelijke typen voorgesteld.



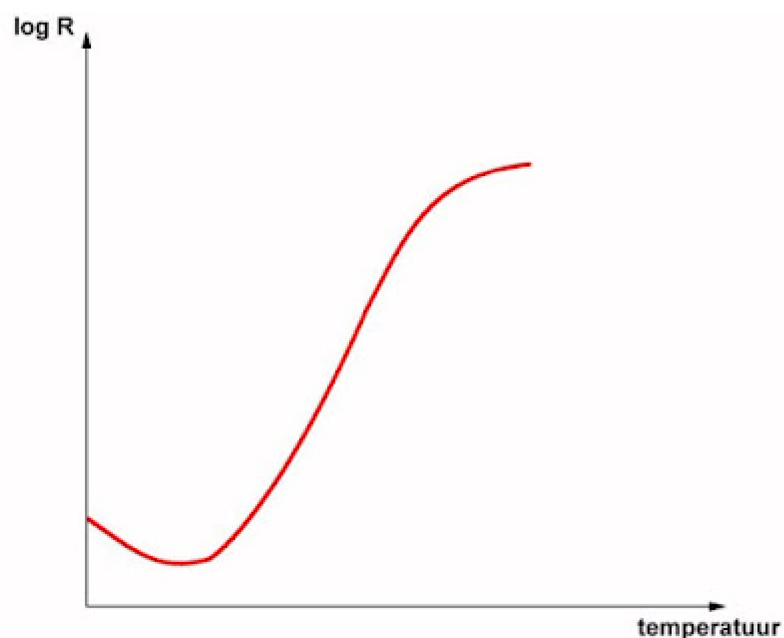
NTC's in de praktijk. (© 2017 Jos Verstraten)

Specificaties
Deze schijfvormige NTC's hebben een maximale dissipatie van 1 W bij een maximale bedrijfstemperatuur van 120 °C, de thermische tijdconstante bedraagt 60 s. Zij worden gefabriceerd met waarden tussen de 2,2 Ω en 60 kΩ bij 25 °C.

PTC-weerstanden

Wat zijn het?
PTC's zijn weerstanden waarvan de weerstand stijgt als de temperatuur van de weerstand stijgt. Omdat er een bepaalde temperatuur bestaat waarbij de weerstand opeens heel erg hoog wordt, kunt u dergelijke weerstanden toepassen voor het ontwerpen van thermische zekeringen, die automatisch in- en uitschakelen.

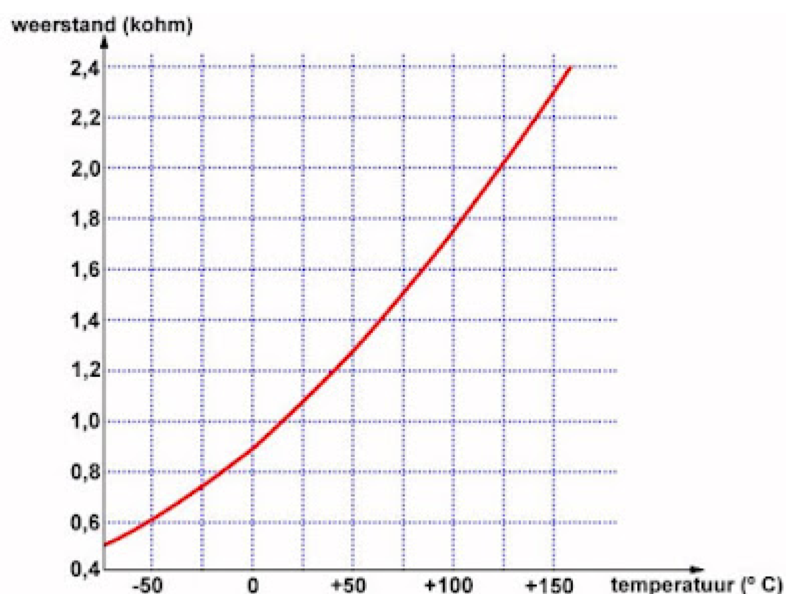
Bariumtitanaat PTC
De klassieke PTC wordt gemaakt met als basis bariumtitanaat. Het onderdeel heeft een soort '*weerstandssprong*'. Dat wil zeggen dat bij een bepaalde temperatuur de weerstand zeer snel wel een factor 1.000 zal toenemen. Buiten dit gebied verloopt de karakteristiek vrij vlak. De weerstand in functie van temperatuur grafiek is getekend in onderstaande figuur. Uit deze figuur blijkt in eerste instantie niets van de sterke weerstandsstijging. Als u er echter rekening mee houdt dat de schaalverdeling van de weerstand-as logaritmisch is, wordt alles echter duidelijk!



De verhouding tussen temperatuur en weerstand van een PTC, waarbij de

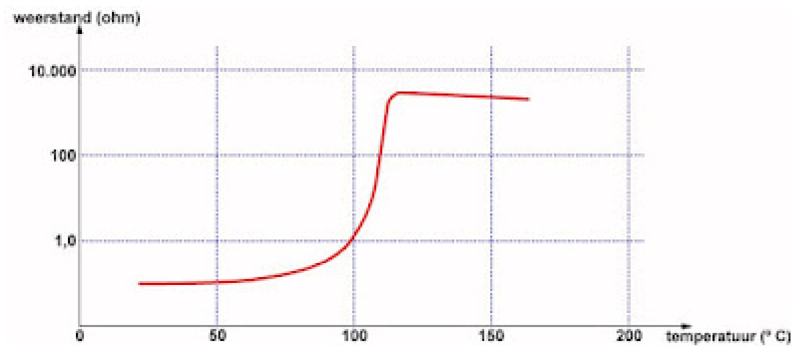
Het PTC-effect
Deze weerstandssprong, ook PTC-effect genoemd, is het gevolg van een tamelijk ingewikkeld fysisch proces. Het komt er op neer dat bij een bepaalde temperatuur zuurstof die tijdens het sinteren werd opgesloten wordt geabsorbeerd aan het oppervlak van de kristalkorrels. Daardoor neemt de weerstand van het materiaal sterk toe.

Silicium PTC's
Het sprongachtige verloop van de weerstand van een normale PTC boven een bepaalde temperatuur wordt gebruikt om schakelingen te beveiligen tegen te hoge temperaturen. Toch zijn er ook toepassingen denkbaar waarbij een lineair verloop tussen temperatuur en weerstandswaarde op prijs wordt gesteld. Voor dit doel heeft men silicium PTC's ontwikkeld. Deze onderdelen worden gefabriceerd uit kristallijn silicium dat verontreinigd werd met een bepaalde stof om de gewenste temperatuurseigenschappen te verkrijgen. In onderstaande figuur is de temperatuur/weerstand-grafiek van een dergelijke PTC getekend.
Silicium PTC's worden geleverd voor werktemperaturen tussen de -8 °C en de +200 °C. Nadeel van deze onderdelen is hun grote tolerantie: toleranties van ±20 % zijn geen uitzondering, terwijl bariumtitanaat PTC's met toleranties van ±0,5 % gefabriceerd worden.



De karakteristiek van een silicium PTC. (© 2017 Jos Verstraten)

Poly-PTC's
Het PTC-effect van bariumtitanaat PTC's kan, zoals reeds geschreven, uitstekend gebruikt worden in allerlei soorten temperatuursbeveiligingen. Het schokeffect in het weerstandsverloop kan echter aanzienlijk verbeterd worden door het ontwikkelen van de zogenaamde 'poly-PTC's'. Zoals uit de grafiek van onderstaande figuur blijkt verloopt de overgang van lage naar hoge weerstand bij deze onderdelen bijna vierkantvormig. Onder een kritische temperatuur is de weerstand vrij constant en vrij laag. Boven deze temperatuur neemt de weerstandswaarde met een factor 100.000 toe en blijft nadien, bij stijging van de temperatuur, vrij constant. Deze PTC's worden gefabriceerd uit een homogene massa, die is samengesteld uit koolstof en een bepaald polymeer. Onder de kritische temperatuur zijn de polymeerdeeltjes klein. De koolstofdeeltjes liggen bijgevolg tegen elkaar aan en de soortelijke weerstand van het materiaal is laag. Boven de kritische temperatuur gaan de polymeerdeeltjes opzwellen. Daardoor worden de koolstofdeeltjes uit elkaar geperst, zodat de soortelijke weerstand van het materiaal zeer sterk stijgt.



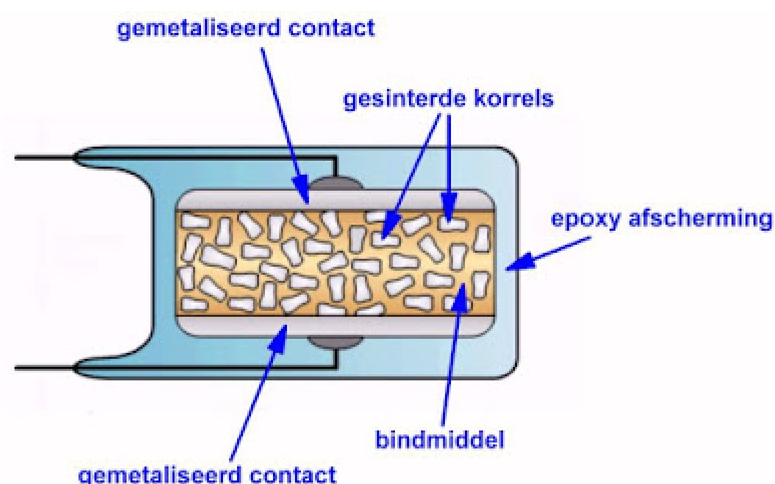
De karakteristiek van de poly-PTC. (© 2017 Jos Verstraten)

PTC's in de dagelijkse lab-praktijk
U zult in de praktijk voornamelijk met de traditionele bariumtitanaat PTC's geconfronteerd worden. Deze worden aangeboden onder de vorm van schijfvormige onderdelen met een diameter van 7,5 mm. Het maximale vermogen dat deze onderdelen kunnen dissiperen bedraagt 0,5 W. De schijfjes worden gekarakteriseerd door één kleur. Daarnaast bestaan er ook PTC's met 10 mm diameter. Deze hebben een maximale spanning van 50 V, een omslagtemperatuur van rond de 100 °C en een weerstandsverhouding van 1/20 tot 1/400.

VDR-weerstanden

Wat zijn het?
VDR's zijn weerstanden waarvan de waarde afhankelijk is van de spanning over de weerstand. De weerstand daalt naarmate de spanning over het onderdeel stijgt. VDR's kunt u gebruiken om onderdelen en schakelingen te beveiligen tegen spanningspieken, bijvoorbeeld op de voedingsspanning.

Fabricage
VDR's, ook wel varistoren genoemd, worden gemaakt met een metaaloxyde poeder als basis. Kandidaten zijn zinkoxyde, titaanoxyde of siliciumcarbide. Dit poeder wordt gesinterd en geperst tussen twee elektroden. De doorsnede van een VDR is getekend in onderstaande figuur.



Doorsnede door een VDR. (© 2017 Jos Verstraten)

Fysische werking
Het niet lineaire verband tussen stroom en spanning kan als volgt worden verklaard. De soortelijke weerstand van het oxyde is zeer laag. Tussen de grenzen van de korrels zit echter het bindmiddel en dit heeft een grote soortelijke weerstand. De doorslagspanning tussen twee korrels is echter vrij laag, namelijk ongeveer 3 V. Als de spanning over de VDR stijgt zullen steeds meer korrelgrenzen doorslaan. Een doorgeslagen grens betekent echter een

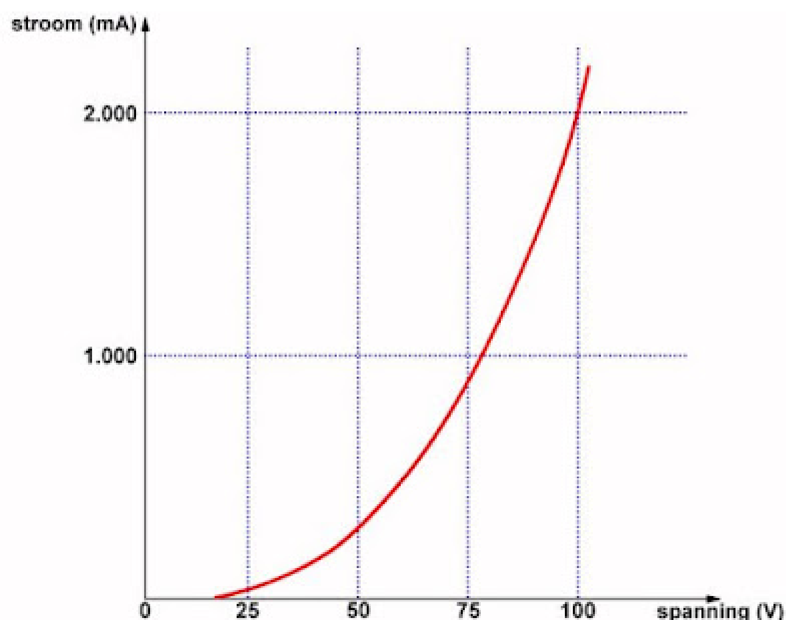
plaatselijke verlaging van de soortelijke weerstand van het materiaal. Daardoor gaat de weerstand van de VDR dalen.

De stroom-spanning karakteristiek
Het verband tussen de stroom door en de spanning over een VDR is getekend in onderstaande figuur. Deze karakteristiek wordt geregeerd door de uitdrukking:

$U = C \cdot I^{\beta}$

waarin:

- U de spanning is over de VDR.
- I de stroom is door de VDR.
- C de spanning over de VDR is als er een stroom van 1 A doorheen loopt.
- β een materiaalconstante.
- p een materiaalconstante is.



Het typische verloop van de I/U-karakteristiek van een VDR.
(© 2017 Jos Verstraten)

VDR's in de dagelijkse lab-praktijk
U zult in de praktijk voornamelijk te maken krijgen met schijfvormige VDR's. Deze worden bijvoorbeeld vaak toegepast in in de geschakelde voedingen van apparaten, voornamelijk in beveiligingsschakelingen. Deze worden voorgesteld in onderstaande figuur. Er bestaan diverse reeksen:
- Een reeks met een diameter van ongeveer 14,5 mm, deze reeks kan 0,8 W dissiperen en bevat 12 weerstandswaarden met C-waarden tussen 18 V en 900 V.
- Een reeks met een diameter van ongeveer 42,5 mm, deze reeks kan 3 W dissiperen en bevat 13 weerstandswaarden met C-waarden tussen 14 V en 980 V.



Schijfvormige VDR's worden in de dagelijkse praktijk het meest gebruikt. (© 2017 Jos Verstraten)